

Forschungsprobleme an Heterostrukturen zwischen polaren und nichtpolaren Halbleitern

Kroemer, Herbert

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1984 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.53-63



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Forschungsprobleme an Heterostrukturen zwischen polaren und nichtpolaren Halbleitern

Von **Herbert Kroemer**, Department of Electrical and Computer Engineering,
University of California, Santa Barbara, California, USA

Einleitung: Das Problem

Unter Heterostrukturen versteht der Halbleiterphysiker Strukturen, die im Idealfalle kristallographisch einkristallin sind, mit einem ungestörten periodischen Kristallgitter für die Atomplätze, in denen sich aber die **Besetzung** der Gitterplätze innerhalb der Struktur von den Atomen eines Halbleiters zu denen eines anderen ändert, ohne daß dabei die Periodizität der Gitterplätze selbst zerstört wird. Dazu ist es natürlich notwendig, daß die beteiligten Halbleiter nahezu dieselben inter-atomaren Abstände haben. Es gibt eine ganze Reihe von solchen gitter-angepaßten Halbleiterpaaren; das zur Zeit in der Praxis wichtigste ist das Paar GaAs/AlAs, welches seit ca. 1970 eine zunehmende Rolle in der Entwicklung neuer elektronischer Bauelemente erlangt hat, besonders des Halbleiter-Lasers. Andere Heterostruktur-Bauelemente befinden sich in der Entwicklung, und es ist die Erwartung vieler auf diesem Gebiet arbeitender, daß die Zukunft derjenigen Bauelemente, die nicht auf Silizium beruhen, von Heterostrukturen dominiert wird [1, 2].

Es ist nützlich, das allgemeine Prinzip zu verstehen, auf Grund dessen Heterostrukturen für zukünftige Halbleiter-Bauelemente so wichtig sein dürften. Der Grund dafür ist im Wesentlichen der Folgende. An der Hetero-Grenzfläche sind sowohl die Valenz- als auch die Leitungsbänder der beiden Halbleiter gegeneinander verschoben. Abbildung 1 zeigt die drei möglichen Arten von gegenseitiger Band-Verschiebung; das GaAs/AlAs-System ist von der links gezeigten Art. Die durch die Verschiebung entstandenen Bandstufen verhalten sich nun genau wie elektrostatische Potentialstufen, aber mit dem wesentlichen Unterschied, daß sowohl die Höhen als selbst die Vorzeichen dieser „quasi-elektrischen“ Potentialstufen für die Elektronen und die Löcher verschieden sein können. Das bedeutet aber, daß ein neuer Freiheitsgrad vorliegt, der es ermöglicht, die Verteilung und den Transport beider Ladungsträger auf eine neue Art und Weise zu kontrollieren, die mit rein elektrostatischen Potentialen grundsätzlich nicht erreichbar ist. Zum Beispiel bei dem links in Abbildung 1 gezeigten Banddiagramm wirken die den Bandstufen entsprechenden Kräfte auf die negativ geladenen Elektronen und auf die positiv geladenen Löcher in derselben Richtung (nach rechts), was mit rein elektrostatischen Kräften unmöglich ist. Der Halbleiter-Laser funktioniert mittels dieser gleichgerichteten Kräfte! Praktisch alle Heterostruktur-Bauelemente nutzen die Bandstufen auf die eine oder andere Art, manch-

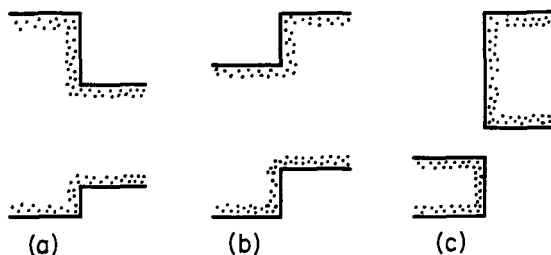


Abbildung 1:

Die drei verschiedenen möglichen relativen Lagen der Energiebänder an einem abrupten Heteroübergang zwischen zwei verschiedenen Halbleitern.

mal, um auf Elektronen und Löcher getrennt einwirken zu können, manchmal, um Kräfte auf Elektronen allein auszuüben, die den vorhandenen elektrostatischen Feldern entgegengesetzt gerichtet sind.

Zusätzliche Halbleiterpaare werden in der weiteren Entwicklung von Heterostruktur-Bauelementen eine ebenso starke Rolle spielen wie GaAs/AlAs, und eines der Forschungsprobleme auf diesem Gebiet befaßt sich mit der Frage, wie sehr voneinander verschieden die beiden Halbleiter sein können. Insbesondere besteht ein großes Interesse daran, einen der III/V-Verbindungshalbleiter mit einem der Elementarhalbleiter zu kombinieren, besonders mit Silizium, welches ja der bei weitem wichtigste Halbleiter überhaupt ist. Von den III/V-Verbindungen ist nur GaP dem Si gut gitter-angepaßt, und wir haben daher in unserer Forschungsgruppe in Santa Barbara das Aufwachsen von GaP auf Si mittels Molekularstrahl-Epitaxie (MBE = Molecular Beam Epitaxy) eingehend untersucht [3, 4].

Wenn man über die Probleme nachdenkt, die beim einkristallinen Aufwachsen eines (polaren) Verbindungshalbleiters wie GaP auf einen (nichtpolaren) Elementarhalbleiter wie Si zu erwarten sind, so erkennt man rasch das folgende zentrale Problem. Das Si und das GaP kristallisieren beide in derselben Diamant-Zinkblende-Struktur, in der die kristallographische Primitivzelle zwei Atome enthält. Aber während diese Atome im Si identisch sind, sind sie im GaP verschieden. Für eine defektfreie GaP-Schicht ist es notwendig, daß die Verteilung von Ga- und P-Atomen auf die Gitterplätze völlig regelmäßig ist. Zum Beispiel müßten in Abbildung 2 alle „weißen“ Gitterplätze mit Ga-Atomen und alle „schwarzen“ Plätze mit P-Atomen besetzt werden. Die entgegengesetzte Besetzung wäre genauso zulässig, aber was um jeden Preis vermieden werden muß, ist ein hin-und-her-Schwanken zwischen diesen beiden erlaubten Strukturen, wie es z. B. in Abbildung 3 für eine Grenzfläche mit der kristallographischen (110)-Orientierung gezeigt ist. Eine solche Mischung würde als **Anti-phasenstruktur** bezeichnet, und die sogenannten **Antiphasengrenzen**, entlang derer die Bereiche umgekehrter Platzbesetzung zusammenstoßen, stellen nicht-akzeptierbare elektronische Störstellen dar. Die Kernfrage ist dann ganz einfach diese: Woher wissen die Ga- und P-Atome der ersten zwei oder drei Atomschichten (auf die es allein ankommt), welche Gitterplätze auf der Si-Oberfläche die Natur für welche

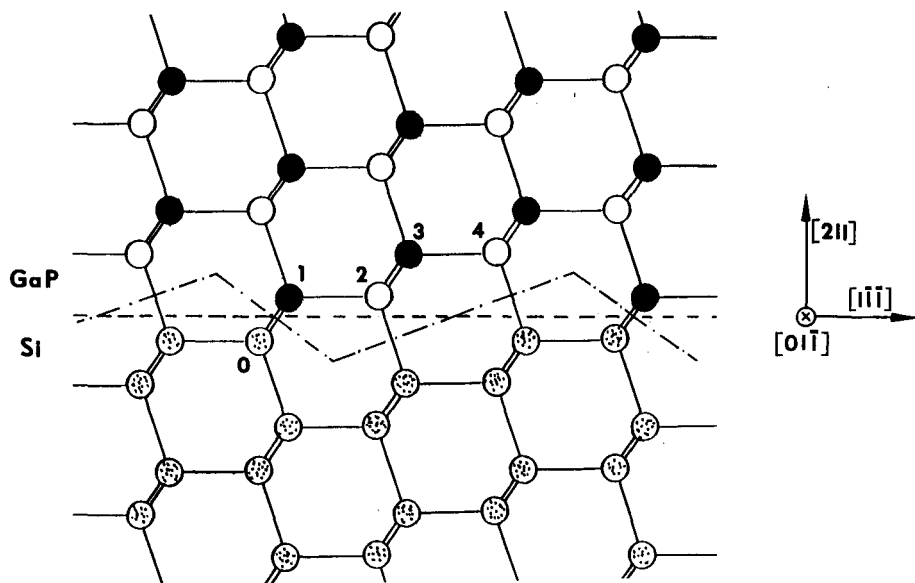


Abbildung 2:

Querschnitt durch eine hypothetische Grenzfläche zwischen einem Silizium-Substrat (unten) und einer aufgewachsenen Gallium-Phosphid-Schicht (oben). Die gezeigte Atomanordnung ist die einer idealen Grenzfläche mit der kristallographischen (211)-Orientierung.

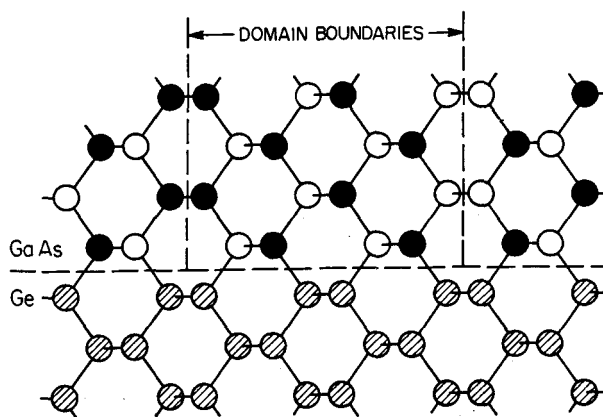


Abbildung 3:

Antiphasenstruktur beim Aufwachsen von GaAs auf eine Ge-Oberfläche mit der kristallographischen (110)-Orientierung (nach Kroemer [2]). Dieselbe Situation liegt bei GaP/Si (110) vor.

Atomart vorgesehen hat? In Abbildung 3 fehlt diese Information; alle noch unbesetzten Oberflächenplätze sind von völlig gleicher Struktur, und es gibt keinen Grund, warum die P-Atome (oder As-Atome) die schwarzen Gitterplätze bevorzugen sollten, und die Ga-Atome die weißen – oder umgekehrt.

Unsere Forschungen haben ergeben, daß die atomare Struktur und Perfektion des polar-auf-nichtpolaren Kristallwachstums ganz entscheidend von der kristallographischen Orientierung und der genauen Atomanordnung der ursprünglichen Kristalloberfläche abhängt, und daß auf der bisher bei weitem am meisten verwendeten (100)-Orientierung (Abbildung 4) ein antiphasen-freies Wachstum in der Tat nicht möglich ist: Auf jeder realen solchen Oberfläche treten immer völlig unvermeidbare atomare Stufen auf, und es läßt sich zeigen [5], daß auf der (100)-Oberfläche diese Stufen zu einer ähnlichen Antiphasenstruktur führen, wie sie in Abbildung 3 für die (110)-Oberfläche gezeigt waren. Das erklärt sofort das völlige Fehlschlagen früherer Versuche, gutes Wachstum von GaP-auf-Si oder GaAs-auf-Ge zu erreichen, fast alles Versuche, die mit der (100)-Orientierung gearbeitet hatten. Es ist notwendig, eine andere Kristallorientierung zu finden, die eine ganze Reihe erst von uns neu-erkannter Bedingungen erfüllt [2–4].

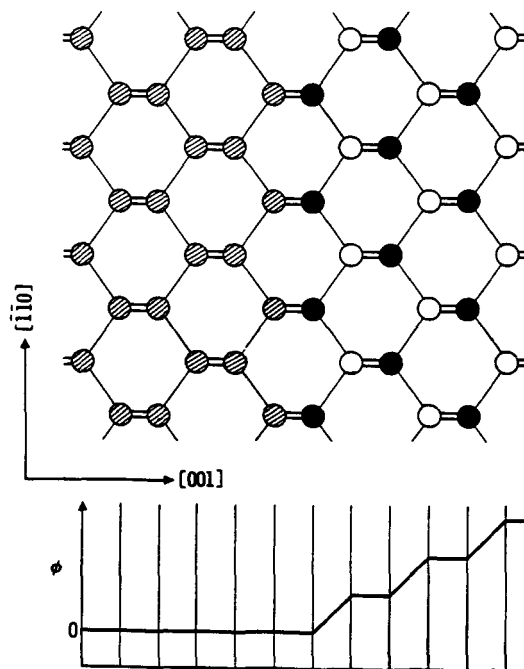


Abbildung 4:

Alternierende P/Ga-Atomlagen bei einer (100)-orientierten GaP/Si- oder GaAs/Ge-Hetero-Grenzfläche, zusammen mit dem elektrostatischen Potentialverlauf, der einer endlichen Grenzflächenladung entspricht. Nach Harrison et al. [6].

Die wichtigste und am leichtesten zu erkennende Bedingung ist das Vorhandensein – auf dieser Oberfläche – von zwei verschiedenen Arten von noch-unbesetzten Gitterplätzen, die mit völlig verschiedener Stärke an die unterliegende Si-Oberfläche gebunden sind. Es stellt sich dann heraus [3], daß die P-Atome, die im Gegensatz zu Ga-Atomen dazu imstande sind, mit Si-Atomen starke Bindungen einzugehen, automatisch die stärker gebundenen neuen Plätze besetzen. Die Ga-Atome werden auf die schwächer gebundenen Plätze verdrängt.

Die nächste Bedingung, die erfüllt werden muß, ist weniger offensichtlich: Die aufeinander folgenden Atomschichten auf der GaP-Seite dürfen nicht von alternierender Struktur sein, also nicht alternierende Ga- und P-Schichten sein, wie z. B. bei der in Abbildung 4 gezeigten (100)-Orientierung. Sie müssen vielmehr alle eine identische Struktur haben. Das hat zwei Gründe: Einmal verhindert es, daß atomare Stufen in der ursprünglichen Oberfläche, die immer vorhanden sind, zur Bildung von Antiphasen-Strukturen führen, wie sie bei der alternierenden (100)-Struktur tatsächlich beobachtet wurden [5]. Zum anderen erzwingt diese Bedingung es, daß jede Atomschicht automatisch die gleiche Anzahl von Ga- und P-Atomen enthält und damit automatisch als Ganzes elektrisch neutral ist (die Ga- und P-Atome sind ja entgegengesetzt geladen). Das Letztere ist wichtig, weil es sich herausgestellt hat [6], daß bei einer nicht-neutralen ersten GaP-Atomschicht sehr starke innere Kristallfelder an der Si/GaP-Grenzfläche vorliegen würden (ca. 40 Millionen Volt/cm, siehe Abbildung 4). Das würde zu einer Wanderung der Atome während des Kristallwachstums führen, welches ja bei hoher Temperatur stattfindet, bei welcher die Atome beweglich sind. Damit entstehen Kristall-Baufehler, die in einer elektronischen Halbleiterstruktur um jeden Preis vermieden werden müssen. Außerdem zeigt es sich, daß in dem Maße, in dem dieses innere Feld durch Atom-Umlagerung nicht abgebaut wird, ein in der Praxis unkontrollierbares Restfeld übrigbleibt, welches, je nach Vorzeichen, freie Elektronen oder Löcher anzieht und damit zu einer unkontrollierbaren hohen, und meist unerwünschten, Leitfähigkeit entlang der Grenzfläche führt. Die (111)-Orientierung ist eine der vielen Kristall-Orientierungen – zusätzlich zur (100)-Orientierung –, die diese elektrische Neutralitätsbedingung verletzt [6].

Die (211)-Orientierung

Die einfachste kristallographische Orientierung, die beide der oben erklärten Forderungen erfüllt, ist die bisher in der Kristallwachstumspraxis fast nie benutzte sogenannte (211)-Orientierung. Abbildung 2 stellte bereits einen Querschnitt durch eine (211)-Grenzfläche dar. Man sieht sofort, daß sie in der Tat beide Forderungen erfüllt: Die an der Grenzfläche gelegenen „schwarzen“ Gitterplätze haben offensichtlich zwei Bindungen zur darunter liegenden Si-Oberfläche und sind damit stärker an diese Oberfläche gebunden als die „weißen“ Gitterplätze mit nur einer Bindung. Außerdem hat ebenso offensichtlich jede Atomebene auf der GaP-Seite dieselbe innere Struktur; der einzige Unterschied ist eine irrelevante horizontale Verschiebung aufeinander folgender Ebenen relativ zueinander.

Es ist uns in der Tat gelungen, mit dieser Kristall-Orientierung GaP/Si-Heterostrukturen mit ausgezeichneter Qualität sowohl der Grenzfläche als auch des GaP selbst zu erreichen. Das einzige Restproblem, das noch gelöst werden mußte, war es, zu verhindern, daß die P-Atome sowohl die schwarzen als auch die weißen Gitterplätze besetzen, was zur Bildung eines der verschiedenen Siliziumphosphide geführt hätte. Dies wurde auf folgende Art vermieden. Die MBE-Technologie ist eine Hochvakuum-Technologie, in der die verschiedenen Bestandteile des Kristalls als Atom- oder Molekularstrahlen dem wachsenden Kristall zugeführt werden [7]. In der von uns entwickelten Technik wird zu Anfang des Wachstums etwas mehr als eine halbe Atomschicht reinen Galliums, ohne Phosphor, auf dem zur korrekten Wachstumstemperatur (580°C) erhitzten Kristall niedergeschlagen. Diese Ga-Atome werden anschließend durch die P-Atome von den doppelt-gebundenen schwarzen Gitterplätzen verdrängt. Aber sowie ein P-Atom auf einem dieser Plätze gebunden ist (z. B. auf Platz Nr. 1 in Abbildung 2), wird der benachbarte einfach gebundene weiße Gitterplatz (Nr. 2 in Abbildung 2) ein stabiler Bindungsplatz für ein Ga-Atom, und da ein großer Vorrat von Ga-Atomen bereitgehalten wird, findet eine solche Ga-Bindung auch rasch statt. Sowie aber die Atomreihe Nr. 2 mit Ga-Atomen aufgefüllt wird, regenerieren sich, in Atomreihe Nr. 3, neue Bindungsplätze für P-Atome. Auf diese Weise liegt immer eine ausreichende Zahl von doppelt gebundenen neuen Gitterplätzen für die neu eintreffenden P-Atome vor, und es bleibt für die P-Atome energetisch unvorteilhaft, die Ga-Atome aus Atomreihe Nr. 1 zu verdrängen. Wenn rechtzeitig Ga-Atome in der richtigen Menge nachgeliefert werden, wiederholt sich das Spiel von Atomreihe Nr. 2 in Atomreihe Nr. 4, und wenn schließlich die Atomebene oberhalb Reihe Nr. 4 voll aufgefüllt ist, handelt es sich beim weiteren Kristallwachstum einfach um das von GaP auf sich selbst, und die Probleme der GaP/Si-Grenzfläche liegen nicht mehr vor.

Die rechtzeitige Nachlieferung der richtig bemessenen Menge von Ga-Atomen wird leicht auf folgende Weise erreicht. Die erste Lage von Ga-Atomen wird bei einer noch kalten Phosphor-Molekularstrahlquelle, also ohne Phosphorstrahl, aufgebracht. Erst nach Aufbringen der ersten Ga-Lage wird die Heizung der Phosphorquelle eingeschaltet. Der P-Strahl ist also anfänglich noch sehr schwach und erhöht sich erst während des Wachstums der ersten paar Atomlagen langsam auf seinen Endwert. Die erste Atomlage wächst also sehr langsam. Da nun die MBE-Technologie eine Hochvakuum-Technologie ist, ist es möglich, die Kristall-Oberfläche während ihres eigenen Wachstums durch Elektronenbeugung zu beobachten. Das Beugungsbild hängt stark vom Ga:P-Atomverhältnis in der obersten Atomebene ab, und mit einiger Übung erkennt man sowohl den Zeitpunkt, wenn eine Ga-Nachlieferung notwendig wird, als auch anschließend, wenn eine hinreichende Menge von Ga-Atomen erreicht ist und die Ga-Zufuhr wieder gestoppt werden muß. Dieses Spiel wiederholt sich bei den folgenden Atomlagen, aber mit immer kürzeren Zeitabständen, weil sich während dieser Zeit die Temperatur der Phosphorquelle und damit die Intensität des Phosphorstrahles erhöht. Die Erhöhungsrate wird so eingestellt, daß der Endwert nach etwa vier bis sechs Atomlagen erreicht wird. Zu diesem Zeitpunkt liegt die GaP/Si-

Grenzfläche völlig innerhalb des Kristalls, und alle ursprünglich vorhandenen Silizium-Oberflächen-Bindungen sind mit der korrekten Atomart abgesättigt. Von dann an bleibt der Verschluß des Galliumstrahles einfach offen. Die Intensität des Phosphorstrahls ist nicht kritisch, solange sie etwas größer als die des Ga-Strahles ist: Überschüssiger Phosphor verdampft einfach; man verwendet bewußt einen Überschuß zwischen 2:1 und 3:1.

Auf diese Weise war es uns möglich, GaP/Si-Heterostrukturen mit guten Eigenschaften sowohl der GaP-Schichten als besonders auch der Grenzflächen zum ersten Male herzustellen. Die Qualität ist noch nicht so hoch wie bei dem viel einfacheren System AlAs/GaAs, aber sie ist bereits ausreichend für experimentelle elektronische Bauelemente. Einfache pn-Übergänge zeigen gute Strom/Spannungs-Kennlinien und oft eine mit den besten Silizium-Solarzellen vergleichbare Lichtempfindlichkeit. Vor allem aber ist es gelungen, Bipolar-Transistoren mit einem GaP-Emitter auf einer Si-Basis/Kollektor-Struktur herzustellen. Die Stromverstärkung dieser ersten Transistoren (< 10) liegt noch weit unter der von reinen Silizium-Transistoren, aber diese Messungen wurden 1981/82 durchgeführt, und in der Zwischenzeit hat sich die Wachstumstechnologie ganz wesentlich verbessert. Wir rechnen daher damit, daß bei einer Wiederaufnahme von Versuchen, Transistoren herzustellen, mit Si-Transistoren vergleichbare Stromverstärkungsfaktoren erreichbar sind.

Es wäre jedoch verkehrt, das Erreichte sowie den Zweck dieser ganzen Forschung als einen Versuch anzusehen, mit der Silizium-Technologie zu konkurrieren. Das ist es nicht: Was immer mit Silizium gebaut werden kann, wird ganz sicher auch weiter mit Silizium gebaut werden! Vielmehr war und ist es der Zweck dieser Arbeiten, die Grenzen der neuen epitaxialen Technologien selbst zu erforschen, besonders der Molekularstrahl-Epitaxie. Das Wichtige am speziellen System GaP/Si ist nicht das Si-Substrat, sondern die Tatsache, daß es ein polar-auf-nichtpolares System ist, die schwierigste Art von Epitaxialsystem. Daher auch der Titel meines Vortrages. Die Auswahl eines solchen Systems hat uns dazu gezwungen, uns zum ersten Male detaillierte Vorstellungen über die Rolle der verschiedenen chemischen Bindungen und der kristallographischen Orientierung beim Wachstum zu machen. Das aber war ein entscheidender Schritt über die bisher vorherrschende Behandlung der Molekularstrahl-epitaxie als einer verfeinerten Hochvakuum-Aufdampftechnik, die im wesentlichen weiter rein phänomenologisch-empirisch verstanden wurde. Insbesondere blieb die Wahl der Kristallorientierung bisher eine praktische Frage statt einer Grundlagenfrage. In dieser Hinsicht beeinflussen unsere Forschungsergebnisse am GaP/Si-System bereits heute die MBE-Technologie allgemein, einschließlich der AlAs/GaAs-MBE-Technologie.

Die Funktion der im Rahmen dieser Forschung hergestellten elektronischen Bauelemente ist nicht die Konkurrenz mit anderen Bauelementen; sie dienen vielmehr als unübertreffliche diagnostische Hilfsmittel, welche uns empfindlicher als jede andere Messung zeigen, wie weit wir auf diesem Wege vorangekommen sind.

Weiterentwicklungen für die Zukunft: „Winkel-Dotierung“ und „Quanten-Röhren“

In unseren obigen Überlegungen spielte die kristallographische Orientierung der Hetero-Grenzfläche eine zentrale Rolle, und ich wies darauf hin, daß diese Grenzfläche nur für bestimmte Orientierungen elektrisch neutral sein kann. Die Frage taucht dann automatisch auf, was denn passiert, wenn die tatsächliche Orientierung etwas von diesem Idealfalle abweicht, selbst wenn es sich nur um den Bruchteil eines Grades handelt. Im Grunde ist das ja unvermeidbar, schon deshalb weil es unmöglich ist, die ursprüngliche Siliziumoberfläche mit mathematisch exakter Orientierung herzustellen. Man kann sich dann davon überzeugen, daß eine solche nicht-ideale Grenzfläche elektrisch geladen sein muß mit einer mittleren Ladungsdichte, die für hinreichend kleine Neigungswinkel proportional zu diesem Winkel ist. Abbildung 5 zeigt als Beispiel den Querschnitt durch einen Hetero-Übergang, dessen Orientierung rela-

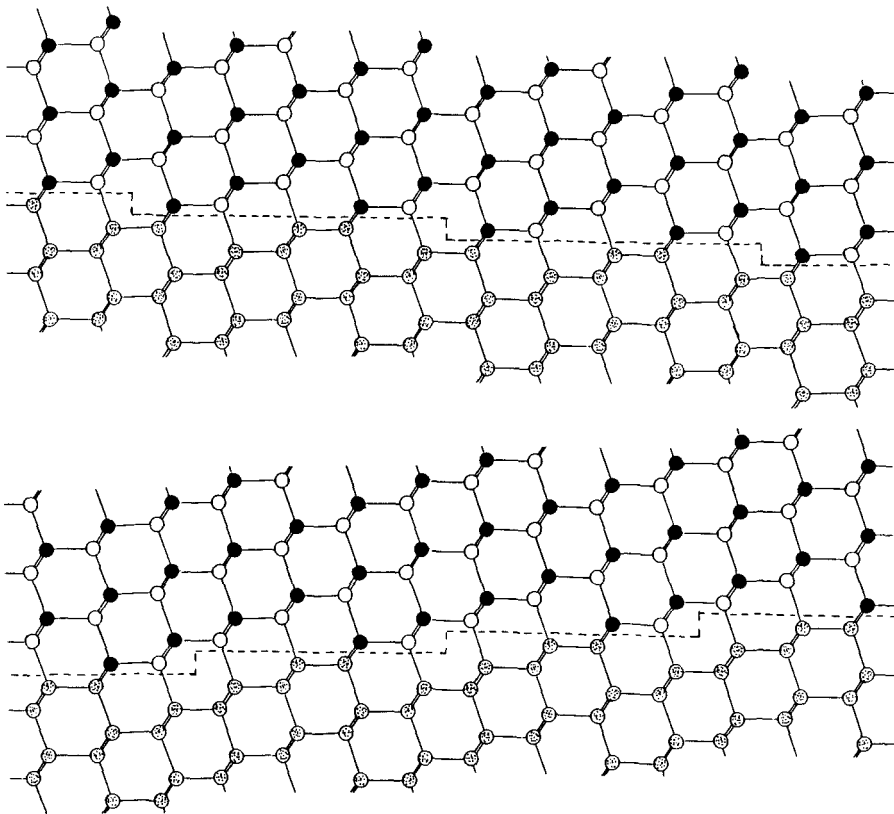


Abbildung 5:
Die Atomanordnung an einer GaP/Si-Grenzfläche, deren Orientierung relativ zur idealen (211)-Orientierung etwas geneigt ist.

tiv zur exakten (211)-Orientierung etwas geneigt ist. Man sieht dann, daß die „chemische“ Grenzfläche, die im Bild gestrichelt gezeichnet ist, nicht eine Ebene ist, sondern Stufen besitzt. Wenn der Neigungswinkel hinreichend klein ist, sind die Stufen durch breite Streifen getrennt, innerhalb derer die chemische Grenze mit einer kristallographischen (211)-Ebene zusammenfällt. Diese Streifen sind dann wieder elektrisch neutral. Aber wenn man sowohl die Ionenrümpfladungen und die Elektronen in den Bindungen abzählt, findet man, daß die Stufen selbst geladen sein müssen. Und zwar sind in der oberen Hälfte des Bildes die Stufen positiv geladen, das heißt, sie sind **Donator-Stufen**, während sie in der unteren Hälfte des Bildes negativ geladene **Akzeptor-Stufen** sind.

Wir haben also hier eine neue Möglichkeit, Dotierungen in einen Hetero-Übergang einzubauen, die in zukünftigen Bauelementen von Bedeutung sein könnte, und die ich als „**Winkel-Dotierung**“ bezeichnen möchte. Die möglichen Dotierungswerte sind hoch: Für einen Neigungswinkel von nur 0,01 Radian (ca. $0,5^\circ$) findet man eine Flächendichte von etwa 6×10^{12} pro cm^2 , für kleinere Winkel proportional weniger.

Wenn nur relativ geringe Grenzflächenladungen erwünscht sind, hat diese hohe Winkelempfindlichkeit natürlich den Nachteil, daß der Einbau solcher Ladungen eine viel genauere Orientierung der Kristallscheiben erfordert, als das gegenwärtig praktisch ist. Andererseits macht die hohe erreichbare Grenzflächendotierung neue Bauelement-Strukturen möglich, die sich durch konventionelle Dotierung mit Fremdatomen einfach nicht herstellen lassen. Wir haben also hier ein erstes Beispiel neuer Möglichkeiten, die sich speziell für polar/nichtpolare Systeme wie GaP/Si eröffnen. Im Moment ist das noch reine Spekulation; erst die Zukunft wird zeigen, was daraus werden wird.

Eine noch viel interessantere Spekulation eröffnet sich, wenn man die räumliche Verteilung der Grenzflächenladungen näher betrachtet. Da diese Ladungen mit den chemischen Stufen in Abbildung 5 verbunden sind, haben wir eine Ladungsverteilung in der Form von **Ladungslinien** statt der statistischen Verteilung über die gesamte Grenzfläche, die für chemische Dotierung mit Fremdatomen charakteristisch wäre. Die Ladungsdichte entlang der Linien ist hoch, man findet einen Abstand zwischen den Ladungen von $a \times \sqrt{8} = 1,54 \text{ nm}$, unabhängig vom Neigungswinkel θ . Hier ist $a = 0,54 \text{ nm}$ die Gitterkonstante des Si. Der Abstand zwischen den Stufen ist

$$D = a / (2\sqrt{6} \times \sin \theta),$$

Für unser früheres Beispiel $\theta = 0,01$ Radian erhält man $D = 11 \text{ nm}$, ein Abstand, der viel größer ist als der Abstand zwischen den Ladungen entlang der Stufen, und der mit abnehmendem Neigungswinkel weiter ansteigt. Das bedeutet ganz sicher eine hohe Anisotropie der Leitungseigenschaften parallel zu einer solchen Grenzfläche, mit einer sehr hohen Leitfähigkeit entlang der Stufen und einer mit abnehmendem Neigungswinkel rasch abnehmenden Leitfähigkeit senkrecht dazu.

Die Sache wird besonders interessant, wenn beide umgebenden Halbleiter mit einem der Stufe entgegengesetzten Leitungstyp dotiert werden. Wenn die Stufen hinreichend weit voneinander getrennt sind, verhält sich dann jede Stufe wie ein röhren-

förmiger pn-Übergang, der von den anderen pn-Röhren elektrisch isoliert ist. Wenn obendrein die Dotierung des umgebenden Halbleiters hinreichend hoch ist, dann wird der innere Durchmesser dieser pn-Röhren so klein, daß die Transversalbewegung der Elektronen innerhalb der Röhre stark quantisiert ist. Im energetisch niedrigsten Quantenzustand ist die Transversalbewegung exakt null, und wenn der nächsthöhere Quantenzustand hinreichend hoch liegt und daher nicht besetzt ist, dann verhält sich jede der Röhren wie ein echt eindimensionaler Leiter, in dem nicht nur der Gesamtstrom parallel zum Leiter fließt, sondern in dem selbst die innere hin-und-her-Bewegung der Elektronen völlig verschwunden ist.

Die Physik eindimensionaler Leiter ist wesentlich verschieden von der selbst des dünnsten dreidimensionalen Leiters, und die Suche nach eindimensionalen Leitern ist eines der aktivsten Gebiete der modernen Festkörperforschung [8].

Eine der Vorhersagen der Theorie – wohl die sicherste von allen – ist eine wesentlich höhere Elektronenbeweglichkeit entlang eines eindimensionalen Leiters als in dreidimensionalen Leitern [9]. Sie kommt dadurch zustande, daß eine elastische seitliche Elektronenstreuung nicht mehr möglich ist, und daß ein Elektron seine Vorwärts-Geschwindigkeit nur durch inelastische Vorwärts-Streuung oder durch Rückwärts-Streuung verlieren kann. Bei hoher Elektronen-Dichte, wie in unserem Falle, ist aber der Leiter entartet, besonders bei tiefer Temperatur, was bedeutet, daß die meisten Endzustände für inelastische Streuung bereits besetzt sind, und daß für Rückwärts-Streuung ein sehr hoher Streuimpuls erforderlich ist, der eine geringe Wahrscheinlichkeit hat. Eine hohe Beweglichkeit wäre natürlich für zukünftige elektronische Bauelemente höchst interessant.

Eine exotischere und damit etwas spekulativere Vorhersage ist ein sogenannter **Peierls-Übergang**, bei dem unterhalb einer bestimmten Temperatur die Leitfähigkeit abrupt verschwindet [10]. Ein solcher Übergang ist in gewissen anderen eindimensionalen Leitern – meistens organische Leiter – bereits gefunden worden, und es wäre äußerst wertvoll, wenn solche oder ähnliche Effekte auch in den Heterostrukturen aus konventionellen Halbleitern erzeugt werden könnten.

Es gibt sogar Spekulationen, daß unter gewissen, bisher nicht erreichten Bedingungen in eindimensionalen Leitern auch der entgegengesetzte Effekt eintreten könnte, nämlich Supraleitung bei höheren Temperaturen als in Metallen [10]. Ich nenne das bewußt Spekulationen, denn es wäre unverantwortlich, zu behaupten, daß solche Supraleitung in unseren Quantenröhren zu erwarten sei. Mein Zweck war es vielmehr, zu zeigen, daß auf jeden Fall ein Reichtum an neuen Phänomenen und Erkenntnissen von dieser neuen Forschungsrichtung erwartet werden kann.

Das bringt mich zum Ende meines Vortrages. Wie Sie wohl alle wissen, erhält die heutige angewandte Halbleiter-Elektronik ständig neue Impulse aus der reinen Festkörperphysik, aus der sie letztlich selbst entsprungen ist. Aber die reine Festkörperphysik hat auch stets ihrerseits starke Forschungsanregungen von den elektronischen Anwendungen erhalten; dieses ständige Wechselspiel ist ganz charakteristisch für das gesamte Halbleitergebiet. Das Problem der polar/nichtpolaren Heterostrukturen ist ein gutes Beispiel für dieses Wechselspiel.

Literaturverzeichnis

- [1] H. KROEMER, „Heterostructure bipolar transistors and integrated circuits“, *Proc. IEEE* 70, 13–25 (1982).
- [2] H. KROEMER, „Heterostructure devices: A device physicist looks at interfaces“, *Surf. Sci.* 132, 543–576 (1983).
- [3] S.L. WRIGHT, M. INADA, H. KROEMER, „Polar-on-nonpolar epitaxy: Sublattice ordering in the nucleation and growth of GaP on Si (211) surfaces“, *J. Vac. Sci. Technol.* 21, 543–539 (1982).
- [4] S.L. WRIGHT, H. KROEMER, M. INADA, „Molecular-beam epitaxial growth of GaP on Si“, *J. Appl. Phys.* 55, 2916–2927 (1984).
- [5] J.H. NEAVE, P.K. LARSEN, B.A. JOYCE, J.P. GOWERS, J.F. VAN DER VEEN, „Some observations on Ge:GaAs (001) and GaAs:Ge (001) interfaces and films“, *J. Vac. Sci. Technol. B* 1, 668–674 (1983).
- [6] W.A. HARRISON, E.A. KRAUT, J.R. WALDROP, R.W. GRANT, „Polar hetero-junction interfaces“, *Phys. Rev. B* 18, 4402 (1978).
- [7] Für zwei Übersichts-Artikel zum Thema Molekularstrahlepitaxie siehe: A.Y. CHO und J.R. ARTHUR, „Molecular beam epitaxy“, *Prog. Solid State Chem.* 10 (Teil 3), 157–191 (1975); K. PLOOG, „Molecular beam epitaxy of III/V compounds“, in H.C. Freyhardt (Editor), **Crystals: Growth, Properties, and Applications**, Springer-Verlag 1980, Bd. 3, 73–162.
- [8] Dem Gebiet fehlt eine für den Neuling verständliche Zusammenfassung, die auch neuere Entwicklungen berücksichtigt. Eine der besten Einführungen ist H.G. Schuster's 12 Jahre alte „Introduction and Survey“ in dem von ihm editierten Tagungs-Band **One-Dimensional Conductors**, Bd. 34 der **Lecture Notes in Physics**, Springer-Verlag 1975.
Nützliche ähnliche Tagungsbände neueren Datums sind H.J. Keller (Editor), **Chemistry and Physics of One-Dimensional Metals**, Plenum Press 1977, sowie J. Bernasconi und T. Schneider (Editoren), **Physics in One Dimension**, Springer-Verlag 1981.
- [9] H. SAKAKI, „Scattering suppression and high-mobility effect of size-quantized electrons in ultrafine semiconductor wire structures“, *Japan. J. Appl. Phys.* 19, L735–L738 (1980).
- [10] Siehe wiederum die unter [8] angegebenen Quellen, die detaillierte Zitate der Originalarbeiten enthalten.